

Artigo Técnico

Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referência no município de São José dos Ausentes (RS), Brasil

Comparison between methods of estimation of reference evapotranspiration in the municipality of São José dos Ausentes (RS), Brazil

Julia Mattia Ongaratto^{1*} , Taison Anderson Bortolin¹ 

RESUMO

A evapotranspiração de referência é uma componente muito importante do balanço hídrico e sua estimativa é essencial para execução de projetos agrícolas e ambientais, estudos de balanço hídrico, projetos e manejo de irrigação, modelagem de processos climatológicos e planejamento do gerenciamento dos recursos hídricos. O método de Penman-Monteith é considerado pela Food and Agriculture Organization of the United Nations como padrão para estimar a evapotranspiração de referência, contudo, dada a dificuldade de se obter um número grande de variáveis meteorológicas que são empregadas nesse método, tem-se utilizado vários outros métodos para estimar a evapotranspiração de referência. O presente trabalho teve como objetivo comparar, por meio de valores diários e mensais estimados pelo método de Penman-Monteith, o desempenho dos métodos de Thornthwaite, Hargraves-Samani, Makkink, Blaney-Criddle, Camargo e Jensen-Haise para o município de São José dos Ausentes, no Rio Grande do Sul. Os dados utilizados para estimar a evapotranspiração de referência foram obtidos pelo sistema Agritempo, que armazena e disponibiliza os dados da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia. Os resultados apontam que o método de Blaney-Criddle foi o que apresentou os melhores resultados nas escalas tanto diária quanto mensal, seguido pelo método de Jensen-Haise, na escala mensal. Já os métodos que apresentaram os piores desempenhos foram o de Thornthwaite e Camargo, sendo classificados com desempenho "sofrível" na escala mensal e como "péssimo" e "mau", respectivamente, na escala diária.

Palavras-chave: Penman-Monteith; métodos indiretos; radiação solar.

ABSTRACT

Reference evapotranspiration is a very important component of the water balance and its estimation is essential for the execution of agricultural and environmental projects, for studies of water balance, irrigation projects and management, modeling of climatological processes and planning of water resources management. The Penman-Monteith method is considered by the Food and Agriculture Organization of the United Nations as a standard for estimating reference evapotranspiration; however, due to the difficulty of obtaining a large number of meteorological variables that are employed in this method, several other methods have been used to estimate the reference evapotranspiration. The present coursework had the objective to compare the performance of the Thornthwaite, Hargraves-Samani, Makkink, Blaney-Criddle, Camargo, and Jensen-Haise methods for the municipality of São José dos Ausentes, using daily and monthly values estimated by the Penman-Monteith method. The data used to estimate the reference evapotranspiration were obtained through the Agritempo system, which stores and makes available the data of the automatic meteorological station of the National Meteorological Institute. The results show that the Blaney-Criddle method presented the best results, both daily and monthly, followed by the Jensen-Haise method in the monthly scale. On the other hand, the methods that presented the worst performances were those of Thornthwaite and Camargo, classified as "poor" on the monthly scale, and as "terrible" and "bad", respectively, on the daily one.

Keywords: Penman-Monteith; indirect methods; solar radiation.

INTRODUÇÃO

Dada a grande preocupação mundial com o uso racional da água, e tendo em vista que a água é um recurso natural de extrema necessidade para o homem, é muito importante o conhecimento acerca dos componentes do ciclo hidrológico, entre os quais, a evapotranspiração destaca-se por sua importância

em abastecer a atmosfera de água (SILVEIRA & STONE, 1994), que posteriormente contribuirá para a ocorrência de chuvas a nível continental. A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) auxilia pesquisadores e profissionais da área na execução de projetos agrícolas e ambientais e é necessária para estudos de balanço hídrico, projetos e manejo de irrigação,

¹Universidade de Caxias do Sul - Caxias do Sul (RS), Brasil.

*Autor correspondente: julia_mattia@hotmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 23/06/2019 - Aceito: 06/11/2020 - Reg. ABES: 20190196

modelagem de processos climatológicos e planejamento do gerenciamento dos recursos hídricos.

Em função da dificuldade para realizar as medições diretas, a aplicação dos métodos indiretos tem-se tornado uma ferramenta em potencial para determinar a evapotranspiração, tal como apresentado nos trabalhos de Sanches *et al.* (2015), Pilau *et al.* (2012) e Paiva *et al.* (2016). Os métodos indiretos são utilizados para estimar a transferência de vapor d'água para a atmosfera em condições climáticas específicas, contudo poucos têm sido adaptados para situações climáticas distintas daquelas que lhes deram origem (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Entre os diversos métodos de cálculo da evapotranspiração, destaca-se o método de Penman-Monteith, recomendado pela Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) e utilizado para a calibração de outros métodos, visto que este se mostra eficiente em diversas condições climáticas. Camargo e Camargo (2000) enfatizam que, em alguns casos, o uso do método de Penman-Monteith é restrito pela falta de algumas variáveis meteorológicas, o que gera a necessidade da utilização de outros métodos indiretos, menos exigentes em relação aos dados requeridos.

Ante o que foi exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho dos métodos indiretos para estimar a ETo, tais como: Thornthwaite, Hargraves-Samani, Makkink, Blaney-Criddle, Camargo e Jensen-Haise, nas escalas diárias

e mensais, comparando com o método padrão de Penman-Monteith FAO, no município de São José dos Ausentes (RS).

METODOLOGIA

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo correspondem ao período de janeiro de 2008 a dezembro de 2010 obtidos por meio do sistema Agritempo e calculados os valores de evapotranspiração com uma aplicação *web* elaborada por Bortolin *et al.* (2018) que utiliza os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), especificamente da estação meteorológica situada em São José dos Ausentes (RS) (Figura 1), com coordenadas geográficas de -28.748615° de latitude e -50.057869° de longitude, com altitude de 1.229 m. O clima da região é classificado, segundo Koppen, como do tipo Cfa, que se caracteriza por apresentar chuvas durante todos os meses do ano e possuir a temperatura do mês mais quente superior a 22°C e a do mês mais frio superior a 3°C. A precipitação pluviométrica total anual pode variar de 1.400 a 1.700 mm.

Os dados dessa estação foram utilizados para o cálculo da evapotranspiração de referência por meio de sete métodos indiretos, nas escalas de tempo diária e mensal, tomando como estimativa padrão o método de Penman-Monteith. Os demais métodos utilizados foram: Thornthwaite, Hargraves-Samani, Makkink, Blaney-Criddle, Camargo e Jensen-Haise.

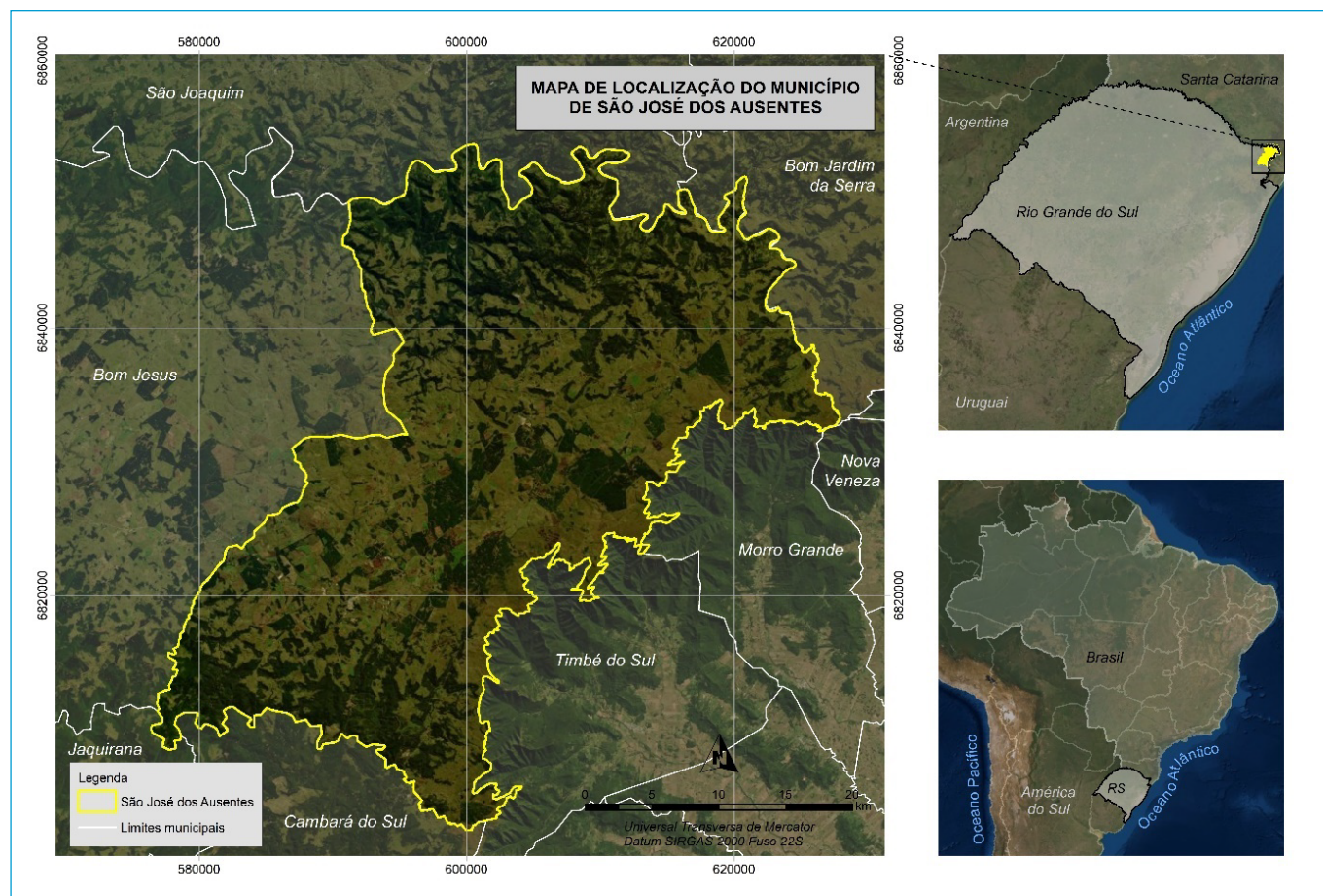


Figura 1 - Localização do município.

Método de Penman-Monteith FAO-56

O método de Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998), obtido por meio de diversas parametrizações, é dado pela Equação 1.

$$ET_o (PM) = \frac{0,408 \cdot \Delta (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_{med} + 273} \right) \cdot U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

Em que:

ET_o (PM): evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith FAO-56 (mm.dia⁻¹);

Δ: declividade da curva de pressão de vapor na saturação (kPa°C⁻¹);

R_n: radiação líquida (MJ m⁻² dia⁻¹);

G: radiação de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹);

γ: constante psicrométrica (kPa°C⁻¹);

T_{med}: temperatura média diária (°C);

U₂: velocidade do vento a 2 metros de altura (m.s⁻¹);

e_s: pressão de vapor na saturação (kPa);

e_a: pressão de vapor atual (kPa).

Método de Thornthwaite

O método de Thornthwaite foi obtido por meio das Equações 2, 3 e 4.

$$ET_o (TW) = 16 \left(10 \frac{T_i}{I} \right)^a \quad (2)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} I + 0,49239 \quad (3)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 T_i)^{1,514} \quad (4)$$

Em que:

ET_o (TW): evapotranspiração de referência estimada pelo método de Thornthwaite (mm.mês⁻¹);

T_i: temperatura média mensal (°C);

a: expoente função do índice anual I;

i: índice mensal de calor para o mês j;

I: índice anual, que corresponde ao somatório dos 12 índices i mensais.

Método de Hargreaves-Samani

O método de Hargreaves-Samani foi obtido por meio da Equação 5.

$$ET_o (HG) = 0,0023 (T_{med} + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot Ra \quad (5)$$

Em que:

ET_o (HG): evapotranspiração de referência estimada pelo método de Hargreaves-Samani (mm.dia⁻¹);

T_{med}: temperatura média do ar diária (°C);

T_{max}: temperatura máxima do ar diária (°C);

T_{min}: temperatura mínima do ar diária (°C);

Ra: radiação solar extraterrestre (MJm²dia⁻¹).

Método de Makkink

Para calcular a evapotranspiração pelo método de Makkink, utilizaram-se as Equações 6 e 7.

$$ET_o(MK) = 0,61 \cdot W \cdot Rs_{(d)} - 0,12 \quad (6)$$

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (7)$$

Em que:

ET_o (MK): evapotranspiração de referência estimada pelo método de Makkink (mm.dia⁻¹);

Rs_(d): radiação solar incidente (mm.dia⁻¹);

W: fator de ponderação;

Δ: declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura;

γ: constante psicrométrica.

Método de Blaney-Criddle

Para calcular a evapotranspiração pelo método de Blaney-Criddle, utilizaram-se as Equações 8, 9, 10 e 11.

$$ET_o (BC) = a + b \cdot [P \cdot (0,46 T_{med} + 8,13)] \quad (8)$$

$$a = 0,0043 UR_{min} - \left(\frac{n}{N} \right) - 1,41 \quad (9)$$

$$b = a_0 + a_1 \cdot UR_{min} + a_2 \cdot \frac{n}{N} + a_3 \cdot U_d + c \quad (10)$$

$$c = a_4 \cdot UR_{min} \cdot \frac{n}{N} + a_5 \cdot UR_{min} \cdot U_d \quad (11)$$

Em que:

ET_o (BC): evapotranspiração de referência estimada pelo método de Blaney-Criddle (mm.dia⁻¹);

P: percentagem média diária de horas de luz para diferentes latitudes;

T_{med}: temperatura média diária do ar calculada pelas temperaturas máxima e mínima do ar (°C);

a + b: coeficientes regionais de ajuste da equação;

a₀: 0,811917;

a₁: (-0,0040922);

a₂: 1,0705;

a₃: 0,065649;

a₄: (-0,0059684);

a₅: (-0,0005967);

UR_{min}: umidade relativa mínima do ar (%);

n: número de horas reais de insolação (h). Pela ausência de medições em campo, considerou-se a equação de Angstrom-Prescott para sua estimativa;

N: fotoperíodo (h);

U_d: velocidade do vento do período diurno a 2 m de altura (m.s⁻¹).

Método de Camargo

Para calcular a evapotranspiração pelo método de Camargo, empregou-se a Equação 12.

$$ET_o (C) = R_{a(dia)} \cdot T \cdot K_F \quad (12)$$

Em que:

ET_o (C): evapotranspiração de referência estimada pelo método de Camargo (mm.dia⁻¹);

$R_{s(dia)}$: radiação solar extraterrestre (MJm^2dia^{-1});
 T: temperatura média diária do ar ($^{\circ}C$);
 K_f : fator de ajuste que varia com a temperatura média anual do ar no local de estudo ($K_f = 0,01$ para $T < 23^{\circ}C$);
 $K_f = 0,0105$ para $T = 24^{\circ}C$;
 $K_f = 0,011$ para $T = 25^{\circ}C$;
 $K_f = 0,0115$ para $T = 26^{\circ}C$;
 $K_f = 0,012$ para $T > 26^{\circ}C$).

Método de Jensen-Haise

As equações utilizadas para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Jensen-Haise foram as Equações 13 e 14.

$$ETo (JH) = R_{s(d)} \cdot (0,0252T = 0,078) \tag{13}$$

$$R_s (mm) = \frac{R_s}{\lambda} \tag{14}$$

Em que:

$ETo (JH)$: evapotranspiração de referência estimada pelo método de Jensen-Haise ($mm.dia^{-1}$);

$R_{s(d)}$: radiação solar incidente (MJm^2dia^{-1});

T: temperatura média diária do ar ($^{\circ}C$);

$R_s (mm)$: radiação solar incidente ($mm.dia^{-1}$);

λ : calor latente de vaporização ($MJ.mm^{-1}$).

Comparação dos métodos

A comparação dos resultados foi executada pelos valores médios mensais da série histórica e também pela análise do desempenho dos métodos de estimativa de ETo em relação à equação padrão ETo (PM) para a escala diária e mensal. Realizou-se a análise de correlação e de regressão linear por meio da geração de gráficos diários e mensais, por meio dos quais foram obtidos os coeficientes linear (a) e angular (b) da equação do tipo $y = ax + b$, em que y é o método padrão de estimativa (ETo (PM), $mm.d^{-1}$) e x é a ETo estimada por meio de outro método ($mm.d^{-1}$).

Também se obtiveram o coeficiente de determinação da regressão linear (r^2), o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d) de Willmott *et al.* (1985) que foram calculados pelas Equações 15, 16 e 17, respectivamente. Todos os cálculos foram realizados com o uso da ferramenta Excel®.

$$r^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (Pi - \bar{P}) \cdot (Oi - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^N (Pi - \bar{P})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (Oi - \bar{O})^2} \tag{15}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Pi - \bar{P}) \cdot (Oi - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Pi - \bar{P})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (Oi - \bar{O})^2}} \tag{16}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N (|Pi - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}|)^2} \tag{17}$$

Em que:

Pi : são os valores estimados pelos métodos propostos;

\bar{P} : média dos valores estimados pelos métodos propostos;

Oi : são os valores estimados pelo Método Penman-Monteith Padrão FAO (ETo (PM));

\bar{O} : média dos valores estimados pelo Método Penman-Monteith Padrão FAO (ETo (PM)).

O índice de concordância de Willmott varia de 0 (total discordância) a 1 (concordância perfeita).

Com base no cálculo de d e r , é calculado o índice de desempenho proposto por Camargo e Sentelhas (1997), denominado de índice de desempenho, dado pela Equação 18.

$$c = r \cdot d \tag{18}$$

Com base nos resultados para esse índice, os autores propuseram uma tabela de avaliação qualitativa (Tabela 1). Os parâmetros de comparação foram calculados para as escalas diária e mensal.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 e na Figura 2 são apresentadas as médias mensais da ETo ao longo dos três anos de cálculo, obtidas por meio dos métodos analisados na área de estudo.

Observa-se que os meses que apresentaram a maior ETo estimada pelo método de Penman-Monteith foram os de dezembro, janeiro e fevereiro, meses nos quais são registradas temperaturas mais elevadas em decorrência do maior índice de radiação solar, contribuindo para o acréscimo de uma demanda evaporativa do ar (Figura 2). Encontraram-se valores superiores a $100 mm.mês^{-1}$, enquanto o mês de junho apresentou os menores valores para todos os métodos, quando se dá início ao período de inverno na Região Sul, e, neste mês, a média entre os métodos utilizados foi de $41,16 mm$, com desvio padrão de $13,09 mm$.

O método de Blaney-Criddle superestimou a ETo em comparação ao Penman-Monteith em todos os meses do ano, com diferenças que variaram entre 10% no mês de junho e 19% no mês de dezembro. Fernandes (2006) e Back (2008) também encontraram resultados semelhantes: os dois constataram tendência à superestimativa do método de Blaney-Criddle ao longo de todo o ano.

Nos meses em que ocorrem as maiores temperaturas, como nas estações de primavera e verão, o método de Hargreaves-Samani superou os valores de Penman-Monteith. Esse método se mostra uma boa alternativa em regiões onde a disponibilidade de dados é limitada, pois depende apenas da temperatura e radiação, porém, conforme Lima Junior *et al.* (2016), ele superestima a equação modelo nos primeiros meses do ano, como também observado neste estudo.

Tabela 1 - Índice de concordância.

Valor de "c"	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 - 0,85	Muito bom
0,66 - 0,75	Bom
0,61 - 0,65	Mediano
0,51 - 0,6	Sofrível
0,41 - 0,5	Mau
≤ 0,40	Péssimo

c: índice de concordância.
 Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

Tabela 2 - Resultados médios mensais de estimativa da evapotranspiração de referência (mm.mês⁻¹) para os métodos utilizados.

Mês / Método	Blaney-Criddle	Camargo	Hargreaves-Samani	Jensen-Haise	Makkink	Penman-Monteith	Thornthwaite	Média	Desvio Padrão
Janeiro	125,86	94,73	119,21	130,31	99,86	105,86	87,90	109,10	16,25
Fevereiro	123,56	85,71	109,17	126,39	94,03	105,65	84,07	104,08	17,05
Março	116,89	76,02	97,87	116,65	89,36	100,30	78,62	96,53	16,47
Abril	100,26	49,93	72,64	81,45	66,92	82,98	55,57	72,82	17,26
Mai	76,18	33,51	53,14	54,85	49,00	63,17	40,64	52,93	14,10
Junho	62,06	23,14	41,54	38,42	38,44	56,07	28,48	41,16	13,90
Julho	85,76	28,27	50,03	50,04	47,29	72,09	35,30	52,68	20,05
Agosto	99,65	38,12	64,72	66,01	58,68	86,83	42,65	65,24	22,14
Setembro	85,46	45,12	74,53	63,43	59,60	72,08	42,39	63,23	15,68
Outubro	107,87	64,26	99,33	94,68	82,60	90,23	57,07	85,15	18,55
Novembro	124,75	83,71	114,72	119,57	94,87	104,41	76,58	102,66	18,36
Dezembro	148,10	94,37	127,17	143,54	111,87	120,20	86,72	118,85	23,15
Média	104,70	59,74	85,34	90,45	74,38	88,32	59,67		
Desvio Padrão	24,59	26,55	29,52	36,01	24,01	19,68	21,97		

Fonte: Elaboração própria.

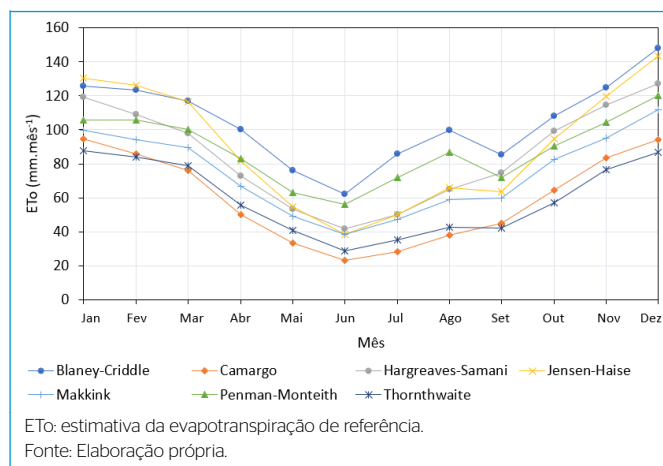


Figura 2 - Médias mensais da estimativa da evapotranspiração de referência.

O mesmo ocorreu com o método de Jensen-Haise, que também superestimou a ETo entre os meses de outubro e março, com diferenças entre 5% (outubro) e 19% (janeiro). Já os métodos de Thornthwaite, Makkink e Camargo apresentaram a tendência de subestimar a ETo em todos os meses do ano. Borges e Mendiondo (2007) afirmam que o método de Thornthwaite possui a tendência a mais erros nos meses secos e menos erros nos meses chuvosos. Camargo *et al.* (1999) comentam que o método original de Thornthwaite não estima satisfatoriamente a evapotranspiração, por não considerar o termo aerodinâmico ou a contribuição da energia latente, e seu resultado pode ter sido reflexo da ausência desse termo em sua formulação. Além disso, cabe destacar que o método de Thornthwaite, diferentemente dos outros métodos, é calculado mensalmente e, por isso, é um método que se torna pouco preciso para uso em tomadas de decisão em curto prazo (CRUZ, 2016).

Os valores diários e mensais estimados de ETo para os diferentes métodos são apresentados respectivamente nas Figuras 3 e 4.

Na escala diária, observa-se que os métodos de Camargo e de Thornthwaite foram os que ficaram mais distantes dos valores estimados por Penman-Monteith, apresentando um valor de r^2 igual a 0,376 e 0,449, respectivamente. A semelhança entre os dois é esperada, já que o método de Camargo foi originado do método de Thornthwaite. Ambos utilizam dados de temperatura de entrada, no entanto Camargo considera um fator de ajuste que varia conforme a temperatura média anual do ar no local de estudo, o que é apontado como o motivo de o método de Camargo apresentar resultados um pouco melhores que Thornthwaite. Quando os valores encontrados para r^2 estão muito baixos, os métodos não se mostram uma boa opção para serem aplicados e há a necessidade de ajustes locais para que a fórmula seja mais eficiente na estimativa de ETo (PALARETTI *et al.*, 2014).

Analisando a Figura 4, assim como o que ocorre na escala diária, na escala mensal os métodos de Camargo e de Thornthwaite ficaram mais distantes dos valores estimados por Penman-Monteith, apresentando um valor de r^2 igual a 0,7730 e 0,7705, respectivamente.

A Tabela 3 mostra os resultados dos índices e coeficientes calculados, além do desempenho de cada método.

Os resultados apresentados na Tabela 3 permitem identificar que, entre os seis métodos analisados, o que apresentou melhor desempenho em relação a Penman-Monteith foi o método de Blaney-Criddle, com desempenho “ótimo” nas escalas diária e mensal com índice de concordância “c” igual a 0,87 e 0,93, respectivamente. Gotardo *et al.* (2016) recomendam a utilização desse método quando houver ausência de longas séries históricas de dados climatológicos que impossibilitem o uso do método padrão de Penman-Monteith, apesar de que a aplicação do método é mais complicada que a de outros métodos que são baseados em temperatura, como Camargo e Hargreaves-Samani (CAMARGO & SENTELHAS, 1997; BORGES JUNIOR *et al.*, 2012).

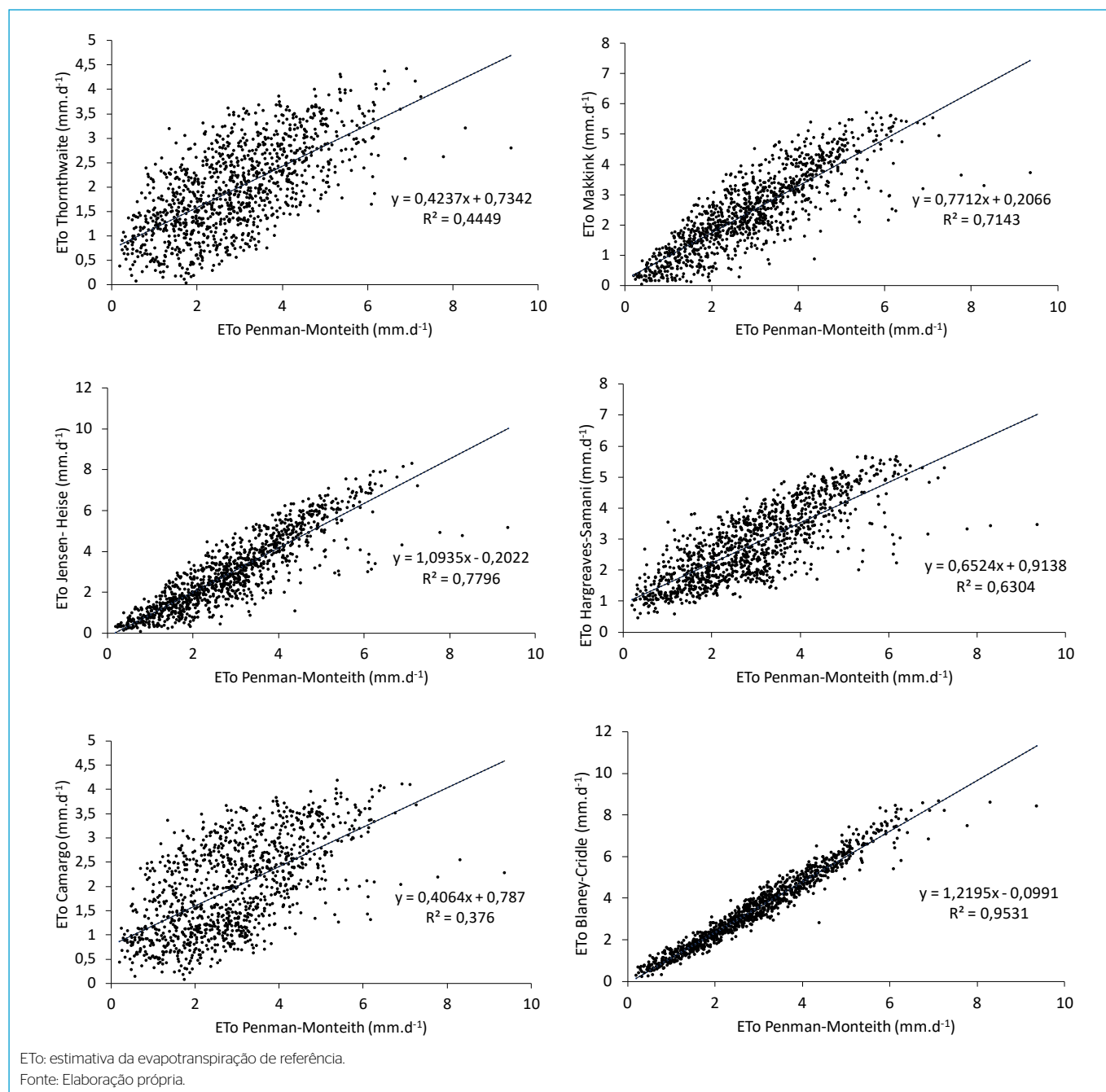
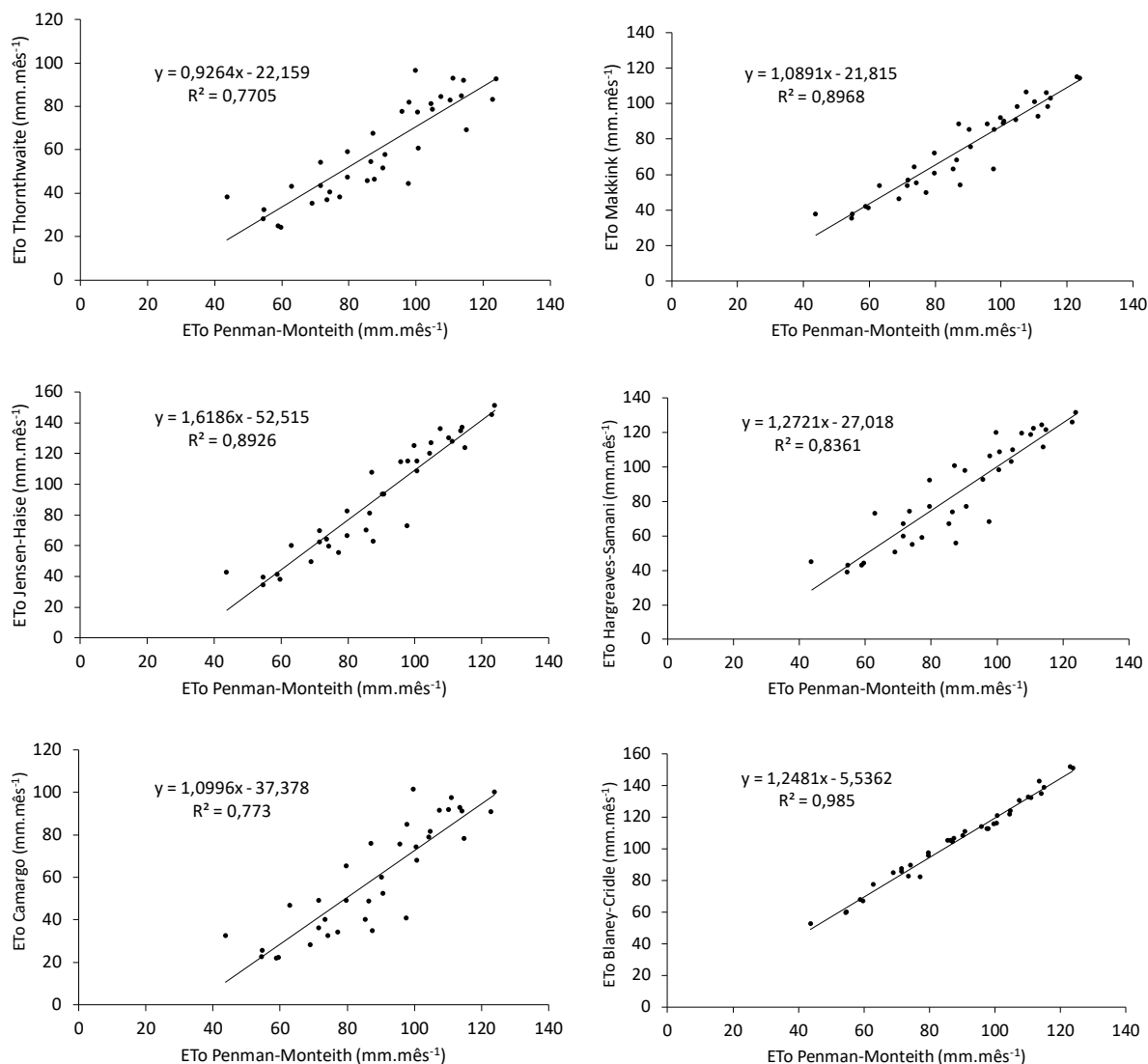


Figura 3 - Correlações entre os valores de estimativa da evapotranspiração de referência observados e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo na escala diária.

O método de Jensen-Haise também foi classificado com desempenho “ótimo”, apresentando índice “c” igual a 0,86 na escala mensal, no entanto o desempenho do método diminui na avaliação em escala diária, sendo classificado como “muito bom”, com valor do índice “c” igual a 0,81. Brixner *et al.* (2014), em estudo realizado na Campanha Gaúcha, constatou que, entre todos os métodos analisados, o que teve o melhor desempenho foi o de Jensen-Haise, com “c” igual a 0,78, sendo classificado como “muito bom”. Segundo Jung *et al.* (2016), o método de Jensen-Haise apresenta um desempenho bom no período de secas, porém inferior no período chuvoso.

Em estudo realizado por Pereira *et al.* (2009) na região da Serra da Mantiqueira, que também possui invernos frios com verões com temperaturas amenas e mais chuvosos, os métodos de Jensen-Haise e Blaney-Cridle também tiveram os melhores desempenhos.

O método de Hargreaves-Samani apresentou desempenho “muito bom” na escala mensal, com valor de “c” igual 0,85 e “d” igual a 0,93, no entanto, na escala diária, o seu desempenho caiu, sendo classificado como “bom”, com coeficiente “c” igual a 0,69. Conceição e Mandelli (2005) e Gonçalves *et al.* (2009) também encontraram resultados semelhantes, ambos classificando o método



ETo: estimativa da evapotranspiração de referência.
 Fonte: Elaboração própria.

Figura 4 - Correlações entre os valores de estimativa da evapotranspiração de referência observados e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo na escala mensal.

com desempenho “muito bom” na escala diária. Pelo fato de esse método utilizar somente dados de temperatura (máxima e mínima) e latitude local, que possui relação com a radiação extraterrestre e varia em função dos dias, pode ser utilizado facilmente, mesmo que não haja dados de radiação solar da região (JUNIOR *et al.*, 2012).

O método de Makkink, que utiliza como variável de entrada a temperatura do ar e a radiação solar global, apresentou desempenho “muito bom”, com valores de “c” igual a 0,83 na escala mensal. Porém, quando analisado em escala diária, o seu desempenho cai, sendo classificado como “bom”.

Entre os métodos analisados, os que apresentaram os piores resultados foram Thornthwaite seguido por Camargo, ambos classificados como “sofrível” na escala mensal. Quando a avaliação é feita diariamente, o desempenho

é ainda pior, sendo classificado como “mau” para Thornthwaite e “péssimo” para Camargo. Apesar de o modelo de Thornthwaite funcionar bem em climas úmidos (CAMARGO & CAMARGO, 2000), ainda que corrigidos pela temperatura efetiva do método de Camargo, esses métodos apresentaram resultados menos satisfatórios do que aqueles que se baseiam na radiação solar. O método de Camargo teve índice “c” igual a 0,59 na escala mensal e 0,40 na escala diária, sendo classificado como “sofrível” e “mau”, respectivamente. Oliveira *et al.* (2008) também encontraram um desempenho “sofrível” para o método, com valor de “c” igual a 0,53.

Os resultados encontrados neste trabalho corroboram os dados de Gonçalves *et al.* (2009), Cavalcanti Junior *et al.* (2010) e Almeida *et al.* (2010), os quais mostram que os métodos baseados na radiação solar apresentaram bons resultados

Tabela 3 - Índice estatístico de comparação entre os métodos para a área de estudo nas escalas mensal e diária.

	r ²	r	d	c	Desempenho
	Mensal				
Blaney-Criddle	0,98	0,99	0,87	0,87	Ótimo
Camargo	0,77	0,88	0,68	0,59	Sofrível
Hargreaves-Samani	0,84	0,91	0,93	0,85	Muito bom
Jensen-Haise	0,89	0,94	0,90	0,86	Ótimo
Makkink	0,89	0,95	0,88	0,83	Muito bom
Thornthwaite	0,77	0,88	0,66	0,58	Sofrível
Diária					
Blaney-Criddle	0,95	0,98	0,95	0,93	Ótimo
Camargo	0,38	0,61	0,66	0,40	Péssimo
Hargreaves-Samani	0,63	0,79	0,88	0,69	Bom
Jensen-Haise	0,78	0,88	0,93	0,81	Muito bom
Makkink	0,72	0,84	0,89	0,75	Bom
Thornthwaite	0,44	0,67	0,68	0,45	Mau

r²: coeficiente de determinação; r: coeficiente de correlação; d: índice de exatidão; c: índice de concordância.

Fonte: Elaboração própria.

em todos eles, indicando que esses são menos dependentes das condições climáticas da área de estudo em comparação aos métodos que são baseados na temperatura. Percebe-se também que o desempenho dos modelos é diferente

dependendo da escala de tempo utilizada, e alguns métodos se adaptam melhor na escala mensal do que na escala diária.

CONCLUSÕES

Com base na utilização de diferentes métodos indiretos de estimativa de evapotranspiração e comparação com o método de referência Penman-Monteith, definido pela FAO, e considerando as condições climáticas da área de estudo, pode-se chegar às seguintes conclusões:

1. Entre todos os métodos analisados, o método de Blaney-Criddle foi o que apresentou as melhores estimativas da evapotranspiração de referência nas escalas tanto mensal quanto diária;
2. Entre os métodos baseados na radiação solar, o que teve as melhores estimativas é o método de Jensen-Haise nas escalas tanto mensal quanto diária;
3. Na impossibilidade do uso do método de referência, dada a falta de algumas variáveis de entrada, os métodos mais recomendados para a região de estudo são o de Blaney-Criddle e o de Jensen-Haise, que obtiveram desempenho classificado como "ótimo" em escala mensal;
4. Os métodos com os piores desempenhos, e por isso a sua utilização não é recomendada para o município de estudo, foram os de Thornthwaite e Camargo.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Ongaratto, J. M.: conceituação, curadoria de dados, análise formal, metodologia, escrita, primeira redação. Bortolin, T.A.: revisão e edição, supervisão.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PERREIRA, L.S.D.; SMITH, M. *Crop evaporation (irrigation and drainage paper 56)*. Roma: FAO, 1998. 301 p.
- ALMEIDA, B.M.; ARAÚJO, E.M.; JUNIOR, E.G.C.; OLIVEIRA, J.B. Comparação de métodos de estimativa da ETo na escala mensal em Fortaleza-CE. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, [s.l.], n. 2, p. 93-98, 2010. <https://doi.org/10.7127/rbai.v4n200610>
- BACK, A.J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga. *Revista Irriga*, v. 13, n. 4, p. 449-466, 2008. <https://doi.org/10.15809/irriga.2008v13n4p449-466>
- BORGES JUNIOR, J.C.F.; ANJOS, R.J.; SILVA, T.J.A.; LIMA, J.R.S.; ANDRADE, C.L.T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 4, p.380-390, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000400008>
- BORTOLIN, T.A., SANTOS, L.M., SILVA, A.G., SCHNEIDER, V.E. Desenvolvimento de uma aplicação web para estimativa de evapotranspiração potencial por diferentes métodos. In: *Anais do XIV SRHNE - Simpósio De Recursos Hídricos do Nordeste*, Maceió, Alagoas, 14 de novembro de 2018.
- BORGES, A.C.; MENDIONDO, E.M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. *Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 293-300, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000300008>
- BRIXNER, G.F.; SCHOFFEL, E.R.; TONIETTO, J. Determinação da evapotranspiração por diferentes métodos e sua aplicação no índice de seca na campanha gaúcha, Brasil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 36, n. 4, p. 780-793, 2014. <https://doi.org/10.1590/O100-2945-381/13>
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CAMARGO, A.P.; MARIN, F.R.; SENTELHAS, P.C.; PICINI, A.G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 7, n. 2, p. 251-257, 1999. Disponível em: [http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1999/1999_RB_Agro_7\(2\)_251-257_ETPThTefativa.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1999/1999_RB_Agro_7(2)_251-257_ETPThTefativa.pdf)
- CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052000000200002>

- CAVALCANTI JUNIOR, E.G.; ALMEIDA, B.M.; OLIVEIRA, A.D.; SOBRINHO, J.E.; ARAÚJO, E.M.; VIEIRA, R.Y. Estimativa da evapotranspiração de referência para a cidade de Mossoró-RN. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 4, n. 2, p. 87-92, 2010. <https://doi.org/10.7127/rbai.v4n200110>
- CONCEIÇÃO, M.A.F.; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 13, n. 2, p. 303-307, 2005. ISSN 0104-1347.
- CRUZ, J.T. *Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração para Brasília - DF*. 2016. 45 p. Monografia (Graduação em Agronomia). Universidade de Brasília, Brasília.
- FERNANDES, L.C. *Avaliação de diversas equações empíricas de evapotranspiração. Estudo de caso: Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão-RJ*. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- GONÇALVES, F.M.; FEITOSA, H.O.; CARVALHO, C.M.; GOMES FILHO, R.R.; VALNIR JÚNIOR, M. Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Sobral - CE. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 3, n. 2, p. 71-77, 2009. <https://doi.org/10.7127/rbai.v3n200016>
- GOTARDO, J.T.; RODRIGUES, L.N.; GOMES, B.M. Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration: an approach to the management of water resources within an experimental basin in the Brazilian. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 36, n. 6, p. 1016-1026, 2016. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p1016-1026/2016>
- JUNG, L.H.; BISCAVO, G.A.; OLIVEIRA, G.Q.; ALVES, M.A.; GIACON, G.M. Estimativa da evapotranspiração de referência em uma região do Alto Pantanal. *Magistra*, v. 28, n. 2, p. 168-177, 2016. Disponível em: <https://magistraonline.ufrb.edu.br/index.php/magistra/article/view/265>
- LIMA JUNIOR, J.C.; ARRAES, F.D.D.; OLIVEIRA, J.B.; NASCIMENTO, F.A.L.; MACÊDO, K.G. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. *Revista Ciência Agronômica*, v. 47, n. 3, p. 447-454, 2016. Disponível em: <http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/4018>
- OLIVEIRA, L.M.M. *Avaliação da evapotranspiração de referência (ET_o) na bacia experimental do riacho gameleira-PE utilizando lisímetro de pesagem hidráulica e métodos indiretos*. 2007. 110 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- OLIVEIRA, L.M.M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; AZEVEDO, J.R.G.; SANTOS, F.X. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 3, n. 1, p. 58-67, 2008. <https://doi.org/10.5039/agraria.v3i1a250>
- PAIVA, C.M.S.; PINHEIRO, A.S. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo da irrigação. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 39, n. 1, p. 42-51, 2016. http://doi.org/10.11137/2016_1_42_51
- PALARETTI, L.F.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C. Comparação entre método de estimativa de evapotranspiração de referência (ET_o) em regiões citricolas Paulistas. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 1, p. 38-47, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000100005>
- PEREIRA, D.P.; YANAGI, S.N.M.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; SILVA, L.A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. *Ciência Rural*, v. 39, n. 9, p. 2488-2493, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009000900016>
- PILAU, F.G.; BATTISTI, R.; SOMAVILLA, L.; RIGHI, E.V. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, RS. *Ciência Rural*, v. 42, n. 2, p. 283-290, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000200016>
- SANCHES, F.M.; XIMENES, A.R.; CORADI, P.C.; ROQUE, C.G.; CUNHA, F.F. Estimativa da evapotranspiração de referência na região norte do Brasil. *Revista de Ciências Agroambientais*, v. 13, n. 2, p. 19-31, 2015. <https://doi.org/10.5327/rcaav.13i2.1179>
- SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. *Manejo da irrigação do feijoeiro: Uso do tensiômetro e avaliação do desempenho do pivô central*. Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 1994. 46 p.
- VAREJÃO-SILVA, M.A. *Meteorologia e Climatologia*. Recife: 2006. Versão Digital, 443 p.
- WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>